

「簡易ピット式変水位法」による 現場透水試験の問題点と適用条件

千 家 正 照*
足 立 忠 司*
西 出 勤*

Problems and restriction of field permeability measurement by
using 'falling head injecting test using augerhole'

Masateru SENGE, Tadashi ADACHI and Tsutomu NISHIDE

Faculty of Agriculture, Gifu University

1. はじめに

現場透水試験法は(1)揚水法と(2)注水法に大別され、「簡易ピット式変水位法」(以下「簡易ピット法」と呼ぶ)は注水法に属するものである。

注水法とは、ボーリングの裸孔等を利用して孔に水を注入し、その浸透量から現場飽和透水係数を推定する方法で、操作が比較的簡便なうえに費用がかからないので、現場の施工管理等でよく用いられている。さらに、この方法は、地下水面の有無にかかわらず適用できることもあって、特に表層土層の透水係数を測定する場合には有力な手段になっている。しかし、注水法ではポテンシャル勾配の推定が不正確になり、揚水法に比べて透水係数の測定精度が悪くなるので、透水係数の概略値を求める試験法として取り扱われている。

代表的な注水試験法としては、Auger-hole法¹⁾、Double-packer法^{2), 3)}、簡易ピット法⁴⁾等が挙げられ、参考までにその概要を以下に紹介するが、このうち本論文では堤体材料などの盛り立て土の透水性を現場で測定するときに多用されている「簡易ピット法」について取り上げ、その適用公式の理論的な誘導過程を振り返ることによって、その時の前提条件から生じる適用上の問題点を明らかにするとともに、数値シミュレーションの結果から適用条件について示した。

II. 現場注水法の代表例

1) Auger-hole法

掘削した測定孔に Fig. 1 に示した定水位給水装置を設けて注水し続け、孔への給水量 Q が時間的に一定になった時の Q と水深 h から透水係数 K を算定する方法である。適用方法は Fig. 2 に示した孔底と地下水面の位置関係から次の3通りに区分される。

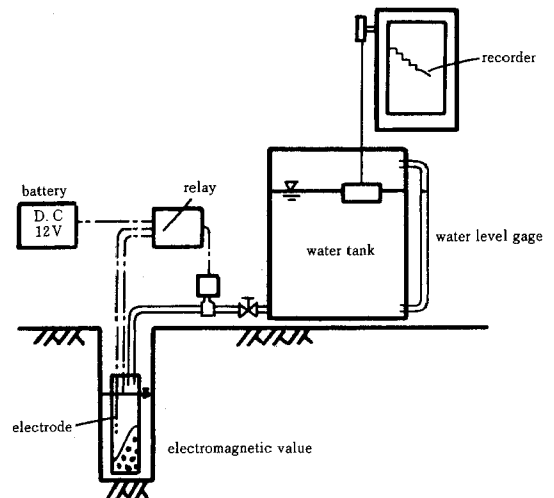


Fig. 1 Outline of constant head permeability test in the field

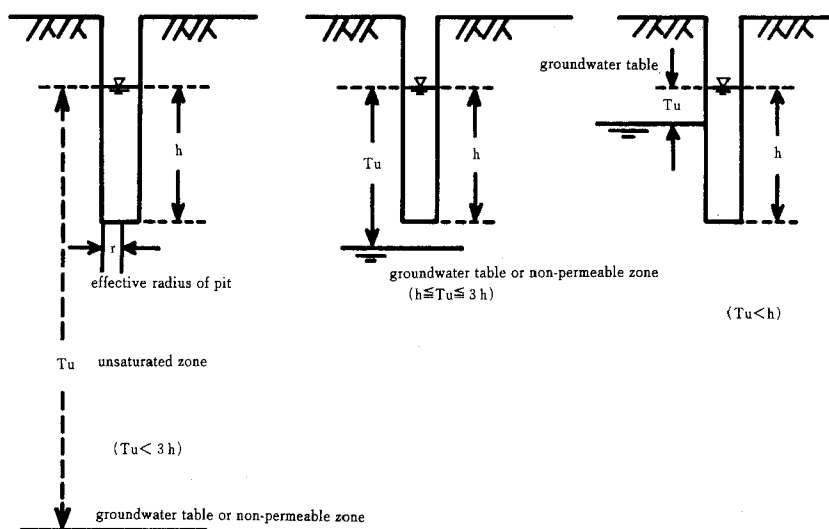


Fig. 2 Relation between water depth in the test pit and groundwater level

① $Tu > 3 \cdot h$ の時

$$K = Q \cdot \frac{[\ln \{ h/r + \{ 1 + (h/r)^2 \}^{0.5} \} - 1]}{2 \pi h^2} = Q \cdot \frac{[\sinh^{-1} (h/r) - 1]}{2 \pi h^2} \quad \dots\dots(1)$$

② $h \leq Tu \leq 3 \cdot h$ の時

$$K = 3 \cdot Q \cdot \ln(h/r) / \{ \pi \cdot h \cdot (h + 2 \cdot Tu) \} \quad \dots\dots(2)$$

③ $Tu < h$ の時

$$K = Q \cdot \ln(h/r) / \{ \pi \cdot Tu \cdot (2 \cdot h - Tu) \} \quad \dots\dots(3)$$

r : 孔径

2) Double-packer法

Fig. 3 に示すように試験区間の上下にパッカーをかけて定圧水を注入し、その注水量から透水係数を求める方法で算定公式は次式のようなになる。

$$K = Q \cdot \ln [L/2r + \{ 1 + (L/2r)^2 \}^{0.5}] / (2 \cdot \pi \cdot H \cdot L) = Q \cdot \sinh^{-1} (L/2r) / (2 \cdot \pi \cdot H \cdot L) \quad \dots\dots(4)$$

Q : 注水量, L : 試験区間長, H : 有効注水頭

3) 簡易ピット式変水位法

Fig. 4 に示すように簡易ピット内に注水し、ピット内の水位低下を測定することによって透水係数を算定する方法で、算定公式は次式のとおりである。

$$K = r^2 / 2 \cdot (t_1 - t_2) [\{ \sinh^{-1} (h_1/2r) / h_1 - \sinh^{-1} (h_2/2r) / h_2 \} + \{ \sinh^{-1} (2r/h_1) - \sinh^{-1} (2r/h_2) \} / 2r] \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 h_1 , h_2 はそれぞれ時刻 t_1 , t_2 ($t_1 < t_2$) における孔内水深

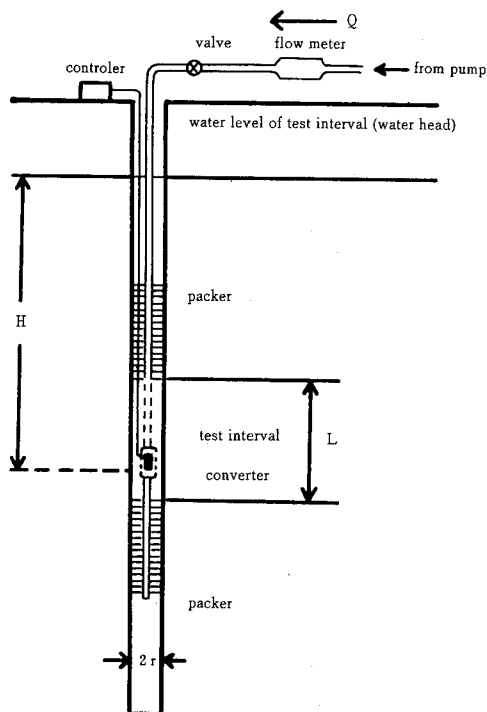


Fig. 3 Outline of double-packer test

さらに、 $h > 10 \cdot r$ の時は次式が適用できる。

$$K = r^2 \cdot [\{ \ln(h_1/r) / h_1 - \ln(h_2/r) / h_2 \} + 1/h_1 - 1/h_2] / \{ 2 \cdot (t_1 - t_2) \} \quad \dots\dots(6)$$

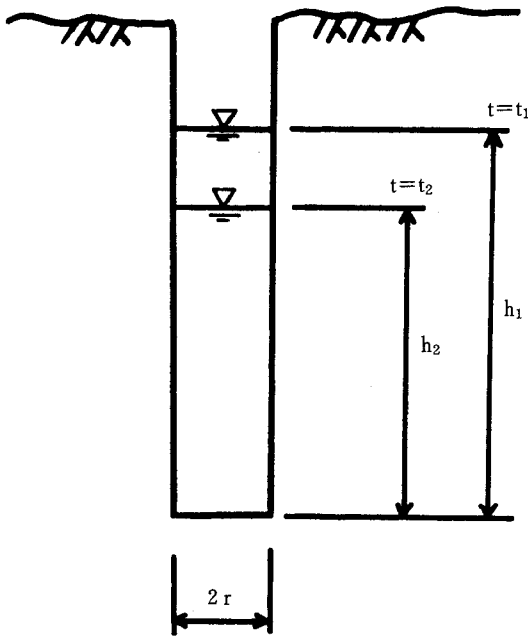


Fig. 4 Outline of 'falling head permeability test using an augerhole'

上記の1), 2)の方法が定水位法であるのに対して3)の方法は変水位法であるが, 3)の適用公式は1)の③及び2)の公式と類似しているのがわかる。これは, 後出の公式誘導の際に詳しく説明するが, 基本的にはこの3方法では等ポテンシャル線が浸出部を中心とした長円体を形成すると仮定していることによるものである。

III. 「簡易ピット法」公式の理論的誘導

ここでは, 山本ら⁶⁾が行ったピエゾメータ式現場透水計の適用公式における誘導過程(これは, Forchheimerが平底浅井戸の公式を誘導した考え方を基本にしている)を参考にして, 「簡易ピット法」公式を誘導することを試みた。その手順としては, 先ず始めに定水位条件(孔内水位一定)の時の関係式を誘導し, 次にこの関係式を時間積分することによって変水位条件の適用公式を誘導した。その展開は以下に示す。

1) 定水位条件

Fig. 5のように無限等方性物質中に孔を掘削し, 孔内水深 h が一定になるように孔内に一定注水(注水量は Q) する場合について考える。ただし, 孔内への注入水は孔壁のみから浸透し孔底からの浸透は存在しないものとする。

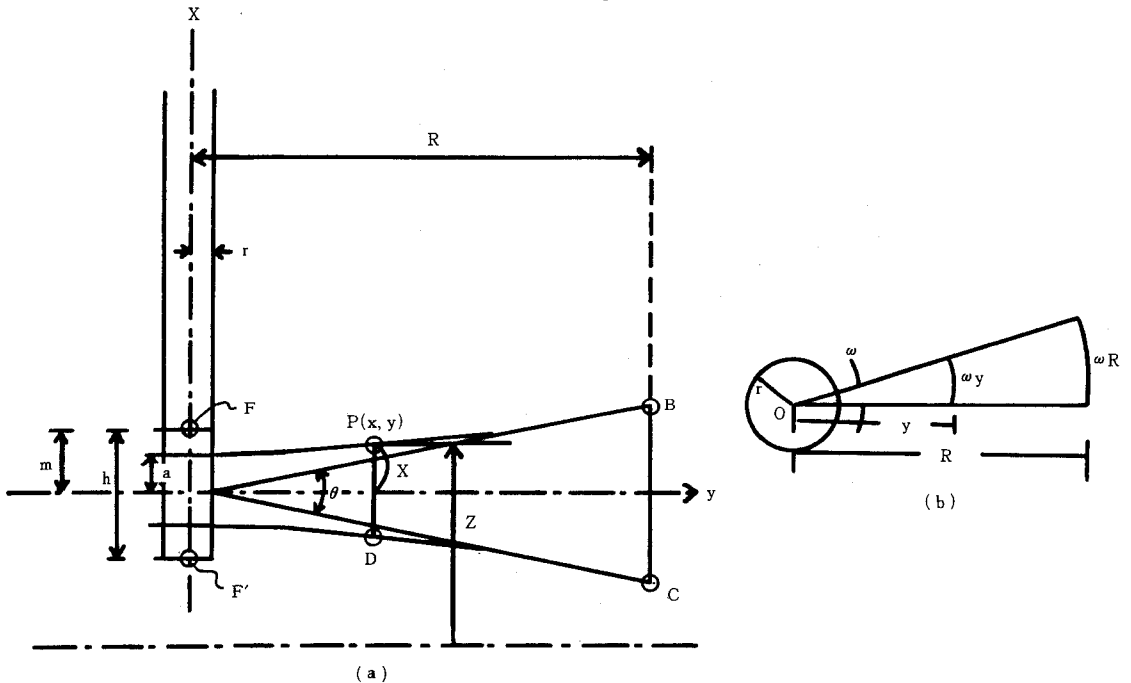


Fig. 5 Diagrammatic representation of constant head penetration

この時の等ポテンシャル線と流線は流入部上下端F, F'を共役焦点とする長円と双曲線であると仮定すると、流線の式は、

$$x^2/a^2 - y^2/(m^2 - a^2) = 1 \quad \dots\dots(7)$$

ここに、x, y: Fig. 5のOを原点とする直交座標軸、

a: 流線のx軸切片, $m = h/2$

となる。

図においてmに比してaの非常に小さな流線を選び、y平面と流線との間に囲まれ、しかも水平角 ω を挟む2つの平面によって取り囲まれた部分を考える。

今、aをmに比して省略し得るものにとつたので、

$$x^2/a^2 - y^2/m^2 = 1 \text{ より} \\ x = (a/m) \cdot (m^2 + y^2)^{0.5} \quad \dots\dots(8)$$

次に等ポテンシャル線は $R \rightarrow \infty$ (R : x軸からの距離)では球面となるので、 $y = R$ の球面を通過する全流量は注入流量Qとなる。また $y = R$ において幅 $\omega \cdot R$ で長さ $BC = R \cdot \theta$ なる面積 $\Delta A = \omega \cdot \theta \cdot R^2$ を通過する全流量を ΔQ とすると、

$$\Delta Q : Q = \omega \cdot \theta \cdot R^2 : 4 \pi \cdot R^2 \quad \dots\dots(9)$$

の関係が成り立つ。

次に点P(x, y)における接線の勾配は $dx/dy = a/[m \cdot \{1 + (m/y)^2\}^{0.5}]$ $\dots\dots(10)$

となり、 $y = \infty$ においては、(10)式は

$$dx/dy = a/m = \theta/2 \quad \dots\dots(11)$$

この関係式を(9)式に代入すると

$$\Delta Q = \omega \cdot \theta \cdot Q / 4 \pi = \omega \cdot a \cdot Q / (2 \pi \cdot m) \quad \dots\dots(12)$$

同一流線束内の流れの連続により、この ΔQ はPD部の面積 $\omega \cdot 2x \cdot y$ を通過する。ゆえに、P点における平均流速をvとすれば、

$$v = \Delta Q / (\omega \cdot 2x \cdot y) \quad \dots\dots(13)$$

このxに(8)式を、 ΔQ に(12)式を代入すれば

$$v = (Q/4\pi) / \{y \cdot (m^2 + y^2)^{0.5}\} \quad \dots\dots(14)$$

一方、Darcy則より、 $v = -K \cdot dz/dy$ が成り立つので

$$dz = -Q \cdot dy / \{4 \pi \cdot K \cdot y \cdot (m^2 + y^2)^{0.5}\} \quad \dots\dots(15)$$

今、 $y = r$ の時 $z = h$ 、 $y \rightarrow \infty$ の時 $z = 0$ の境界条件について上式を積分すると

$$\int_0^h dz = - \{Q / (4 \pi \cdot K)\} \cdot \int_r^\infty dy / \{y \cdot (m^2 + y^2)^{0.5}\} \quad \dots\dots(16)$$

$$h = \{Q / (4 \pi K)\} / 2m \cdot \left[\ln \left[\frac{(m^2 + y^2)^{0.5} - m}{(m^2 + y^2)^{0.5} + m} \right] \right]_r^\infty$$

よって、透水係数は、

$$K = (Q/2\pi) \cdot \sinh^{-1}(h/2r) / h^2 \quad \dots\dots(17)$$

から求めることができる。

このとき、水深hをFig. 3の試験区間長Lに置き換えると、Double-packer法の適用公式と一致することがわか

る。

また、 $h \geq 10 \cdot r$ のとき、(17)式における $(m/r)^2 + 1 = (m/r)^2$ の関係が近似的に成り立つので(17)式は次式のように変形できる。

$$K = (Q/2\pi) \cdot \ln(h/r) / h^2 \quad \dots\dots(18)$$

2) 変水位条件

次に、孔内への注水が無く孔内水位が孔壁からの浸透によって低下する場合について考える。

この時の孔内における連続式は

$$\pi r^2 \cdot dh/dt = -Q \quad \dots\dots(19)$$

この時、Qは孔壁から浸透する流量で孔内水深hから(17)式によって決まるものとする。

(19)式のQに(17)式を代入し、両辺を時間積分すると

$$-\pi r^2 \int_{h_2}^{h_1} dh / Q = \int_{t_1}^{t_2} dt \\ -\pi \int_{h_2}^{h_1} \{1 / (2 \pi \cdot K)\} \cdot \sinh^{-1}(h/2r) / h^2 dh = (t_2 - t_1)$$

上式の結果より、

$$K = r^2 / 2 (t_1 - t_2) \left[\frac{\sinh^{-1}(h_1/2r)}{h_1} - \frac{\sinh^{-1}(h_2/2r)}{h_2} + \frac{\sinh^{-1}(2r/h_1)}{(2r/h_1)} - \frac{\sinh^{-1}(2r/h_2)}{(2r/h_2)} \right] \quad \dots\dots(20)$$

さらに、 $h > 10 \cdot r$ の時は(17)式の変形と同様の方法で次式が得られる。

$$K = r^2 \cdot \left[\frac{\ln(h_1/r)}{h_1} - \frac{\ln(h_2/r)}{h_2} + 1/h_1 - 1/h_2 \right] / \{2 \cdot (t_1 - t_2)\} \quad \dots\dots(21)$$

IV. 誘導仮定の前提条件と適用の際の制約条件

以上の誘導過程を振り返ってみると、理論的解析が可能になるように様々な前提条件を設けて現象を単純化しているのがわかる。ここでは、この単純化に伴って生じた適用条件について検討し、「簡易ピット法」の問題点について考察する。

1) 誘導過程の前提条件

前記の誘導過程の中のアンダーラインに示したように、次の4つの前提条件が設けられている。

- ① 孔は無限等方性物質内に存在する。
- ② 孔壁からは浸透するが孔底からは浸透しない。
- ③ 等ポテンシャル線は回転長円体、流線は双曲線体とする。

④ (19)式中の右辺のQに定水位条件で誘導された(17)式を用いている。

2) 適用の際の制約条件と問題点

以上の4つの前提条件が設けられたことによって、公式の適用の際に生じる制約条件と問題点について整理すると以下の通りである。

① 透水条件の異方性については無構造の盛土等の透水試験ではさほど問題にならないと思われるが、異方性の取扱いが必要になる場合には、次式が有効である。水平透水係数を K_h 、垂直透水係数を K_v とすると、 $n=(K_h/K_v)^{0.55}$ を使って、(20)式は

$$K_h = r^2 / 2 (t_1 - t_2) [\{ \sinh^{-1} (n \cdot h_1 / 2r) / h_1 - \sinh^{-1} (n \cdot h_2 / 2r) / h_2 \} + \{ \sinh^{-1} (2r/nh_1) - \sinh^{-1} (2r/nh_2) \} / (2n \cdot r)] \dots\dots(20)$$

さらに、 $h > 10 \cdot r$ の時は(17)式の変形と同様の方法で次式が得られる。

$$K_v = r^2 \cdot [\{ \ln(n \cdot h_1 / r) / h_1 - \ln(n \cdot h_2 / r) / h_2 \} + 1/h_1 - 1/h_2] / \{ 2 \cdot (t_1 - t_2) \} \dots\dots(23)$$

となる。

但し、以上の式を適用するには、 K_h と K_v の比を予め明らかにするか、仮定することが必要になる。

② 孔底からの浸透の影響を小さくするためには、当然の事ながら水深 h に対して孔径 r を小さくする必要がある。孔底からの浸透の効果を10%以内に抑えるためには、浸透面積を試算することによって $h > 5 \cdot r$ 程度の水深を必要とすることがわかる。

③ ポテンシャル勾配を実測しないこの種の試験法では、等ポテンシャル線を何らかの関数形で近似することが理論解を誘導する場合に不可欠な操作となる。これが、注水試験法による測定精度を低下させる原因の一つになっている。

今回のように等ポテンシャル線を回転長円体で仮定すると重力ポテンシャルの効果を無視することになり、測定結果に重力ポテンシャルの影響を少なくするには孔内水深を大きくすることが必要となる。

Double-packer法では試験区間内に高圧水を注水しているので全ポテンシャルに比べて重力ポテンシャルの効果が無視できることになる。

④ 孔内水位の低下速度が大きくなると連続式(19)の非定常性が強くなるので、各時刻における等ポテンシャル線は定水位条件の等ポテンシャル線からかい離してしまう。すなわち、孔径を細くし過ぎると等しい浸透強度に対しても水位の低下速度が大きくなり測定精度の低下を招くことになる。

V. 数値シミュレーションによる検討

以上に示した適用条件はいずれも定性的推論に留まっている。実際の適用の際には測定条件と前提条件とのかい離が原因となって生じる測定誤差を数値計算あるいは予備実験により予め把握し、要求する精度を満足してい

るかどうかを検討することが必要であろう。

そこで、特に上記②③の2項目が原因となって生じる推定誤差について検討する。実際には「簡易ピット法」での浸透現象は非定常であるが、上記④の影響を除外するために、ここでは定水位条件下における土壌水の浸透現象を数値シミュレーションし、その結果から孔内水深 h の大小と適用公式によって計算される透水係数 K の精度との関係を明らかにしてみる。

1) 基礎方程式

定常状態の土壌水の浸透流現象を表現する基礎方程式として、連続式とDarcy式を不飽和浸透現象まで拡張した⁷⁾次式を与えた。

$$\text{div } K(\phi) \cdot \nabla (\phi + z) = 0 \dots\dots(24)$$

ここで、 $K(\phi)$ は不飽和透水係数、 ϕ はマトリックスポテンシャル、 z は重力ポテンシャルである。

さらに、不飽和透水係数を次式で表わした。

$$\begin{aligned} \phi < h_s, \quad K(\phi) &= K_s \cdot (\phi/h_s)^{-a} \\ \phi \geq h_s, \quad K(\phi) &= K_s \end{aligned} \dots\dots(25)$$

ここに、 K_s は飽和透水係数、 h_s は空気浸入値、 a は土壌に固有の正の係数である。

「簡易ピット法」における水の浸透現象が軸対象であるので(24)式を円筒座標系に変換すると次のように書き表される。

$$\frac{\partial}{\partial r} (K_r \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{K_r}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \phi}{\partial z}) = 0 \dots\dots(26)$$

ここで、 K_r 、 K_z はそれぞれ半径方向と鉛直方向の不飽和透水係数である。

この(26)式を有限要素解析法に従って展開した。この時

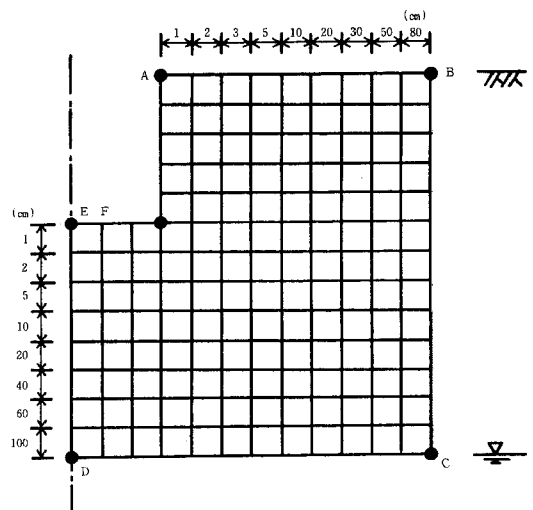


Fig. 6 Diagrammatic representation of simulation model

の浸透場は複数の矩形要素で構成するものとし、各要素内のマトリックポテンシャルの変化は2次元の線形補完関数で近似した。

2) 解析結果と考察

「簡易ピット法」試験のシミュレーションとして、Fig. 6 に示すような節点数167, 要素数145の解析モデルを考えた。この場合は軸対称であるのでこのように中心を通る一断面の片側だけを取り扱えば十分である。

境界条件は、便宜的に図中のB, BC, ED部が(流量=0), DC部には地下水面(孔底から238cmの位置)が存在するものとして($\phi=0$)を与えた。さらに、孔の中は一定水深が維持されるので、EF, AF部にはFig. 7に示すようなポテンシャル境界条件を与えた。

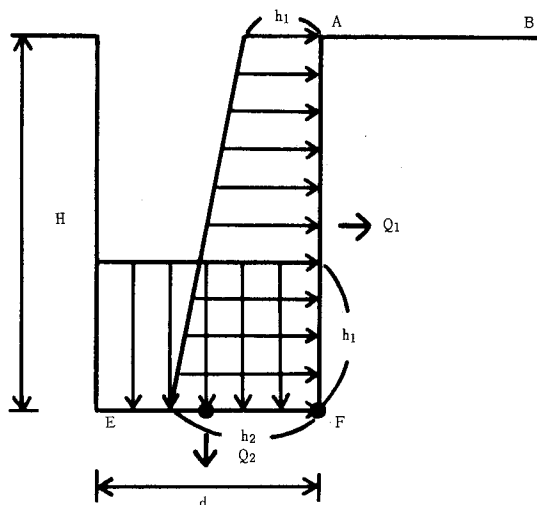


Fig. 7 Distribution of pressure potential in test pit

計算条件としては、孔深が12.5, 25, 50, 100cmの4通りについて考えた。孔内の水位は地表面(図中のABレベル)に存在するものとし、特に孔深が50, 100cmについては水位が地表面上50, 100cmに存在する場合(後出のFig. 8, 9の試験法に相当する)についても考えた。孔径($=2 \cdot r$)は全ての計算ケースについて15cmとした。

土壌条件としては、(25)式における h_s , K_s , a は、それぞれ $-100\text{cmH}_2\text{O}$, 0.001cm/s , 3.0 を与えた。表-1は計算条件と計算結果を整理したものである。

数値シミュレーションの結果から得られた浸透量 Q を「簡易ピット法」の適用公式に代入して透水係数 K を求めると、いずれの計算ケースの場合も所与の値($=0.001\text{cm/s}$)よりも大きくなっている。しかし、孔深が大きくなるにつれて計算された透水係数は 0.001cm/s に

Table 1 Consequence of simulation

計算 ケース	孔深 H(cm)	H/d	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Q (cm^3/s)	Q1 (cm^3/s)	Q2 (cm^3/s)	K (cm/s)
1	12.5	0.78	0	12.5	28.7	22.6	6.1	0.022
2	25.0	1.67	0	25.0	37.6	32.8	4.8	0.012
3	50.0	3.33	0	50.0	50.8	47.2	3.6	0.0062
4	50.0	3.33	50	100.0	53.2	49.1	4.1	0.0033
5	50.0	3.33	100	150.0	56.0	51.4	4.6	0.0023
6	100.0	6.66	0	100.0	70.9	67.8	3.1	0.0029
7	100.0	6.66	50	150.0	75.8	72.1	3.7	0.0021
8	100.0	6.66	100	200.0	81.6	77.4	4.2	0.0017

(備考) H:孔深, d:孔径, h_1, h_2 :図-7に示した位置の圧力ポテンシャル, Q:浸透量, Q1:孔壁からの浸透量, Q2:孔底からの浸透量, K:Qから(17)式によって計算される飽和透水係数

近ずいていくのがわかる。これは、前提条件②③の効果によるものであり、前記における考察を証明している。さらに、孔内の水圧を高くした計算ケース4, 5, 7, 8では透水係数の測定精度が向上しているのがわかる。

このように、「簡易ピット法」を適用する場合、今回の数値シミュレーションの結果から、透水係数の測定精度をオーダの単位まで要求する時には少なくとも孔深を50cm以上、孔深と孔径の比(H/d)を4以上にすることが必要であり、さらに有効数字1桁の精度まで要求する時には加圧水を注入する後出のような方法に頼らざるを得ないことを示している。

VI. 改良法の一考察

既に論じられてきたように、孔深が大きいほどさらに孔内水圧が高いほど透水係数の測定精度が良くなるのがわかる。このような結論を踏まえ、図-8のようなDouble-packer法を応用した変水位透水試験装置⁴⁾に改良すれば、測定精度の向上が計られることは明らかである。さらに、この時の給水アクリル管の径を孔径より大きくすれば非常性の問題もある程度解消されるものと思われる。しかし、「簡易ピット法」に比べて測定装置が複雑になるのが欠点である。この測定法の適用公式を誘導すると次式の通りになる。

$$K=r^2 \cdot \sinh^{-1}(L/2r_0) \cdot \ln(h_2/h_1) / \{2 \cdot L \cdot (t_1 - t_2)\} \quad \dots\dots(27)$$

一方、 $h > 10 \cdot r$ の時

$$K=r^2 \cdot \ln(L/r_0) \cdot \ln(h_2/h_1) / \{2 \cdot L \cdot (t_1 - t_2)\} \quad \dots\dots(28)$$

さらに、Fig.9のように給水アクリル管をマリオット方式にすれば、簡単に定水位透水試験装置になり、(4)式を適用することによって透水係数を求めることができる。このときのQはアクリル管内の水位低下速度から、また有効水頭Hは孔の中心からマリオット管の先端までの高さで与えることができる。

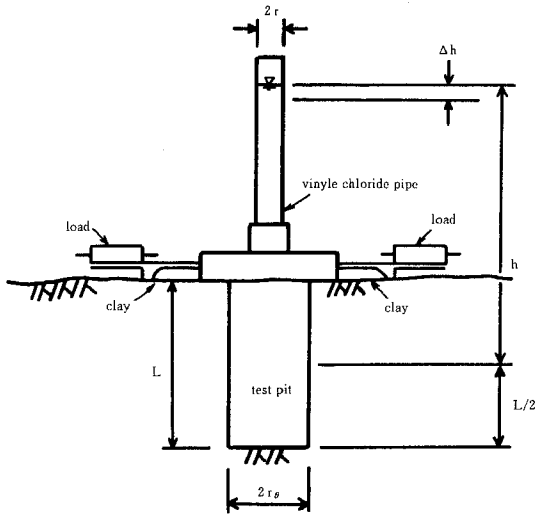


Fig. 8 Falling head permeameter which applies double-packer test

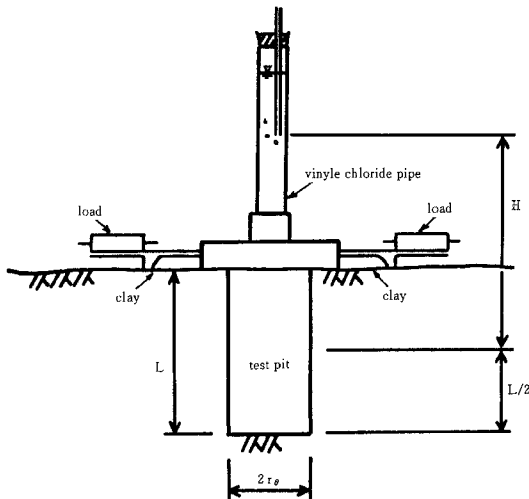


Fig. 9 Constant head permeameter which applies double-packer test

VII. あとがき

「簡易ピット法」公式の適用条件について、その誘導過程における前提条件を明らかにすることによって、さらに数値シミュレーションすることによって検討を加えた。その結果、現場透水係数をオーダの精度で測定する時には、本試験法でも十分に実用に耐え得ることが示され、その測定法の簡便さを考慮すると有力な現場透水試験であることが証明された。今後、数値シミュレーションを重ね、屋外の透水実験を行うことによって、「簡易ピット法」の適用条件の定量化を進める予定である。
(謝辞) 本研究の数値計算の部分においては、岐阜大学農学部西村直正氏、及び同清水英良氏の多大な助言と御指導を戴いた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理測定法，養賢堂，1980，pp. 186-190
- 2) Hvorslev M. J.: Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterway Expt. Sta. Corps of Engineers, Bull. 36, U. S. Army, Vicksburg, Mississippi.
- 3) Price, M., Morris, B. and A. Robertson: A study of Intergranular and Fissure Permeability in Chalk and Permeau Aquifer, Using Double-packed Injection Testing. J of Hydrology, 54 (1982), pp. 401-423
- 4) 大ダム会議編：ダムマニュアル
- 5) 山本荘毅：新版地下水調査法，古今書院，pp. 206-207, 1983
- 6) 山本 茂：ピエゾメータ式泥炭現地用透水計の形状係数について，農土研，第25巻第5号，pp. 16-23, 1957
- 7) Shlomo P. Neuman: Saturated-Unsaturated Seepage By Finite Elements, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY12, Proc. Paper 10201, December, 1973, pp. 2233-2249

(1986. 11. 6受理)

Summary

An equation representing the "falling head permeability test using an augerhole" was derived theoretically, and the assumptions associated with the derivation process were clarified. On the other hand, the soil water flow under these measurement conditions was simulated by using a finite element method. A comparison of the two indicated that the theoretical equation had many restrictions in relation to the simulation results; however the theoretical equation could be used with sufficient accuracy in estimates of the saturated permeability.